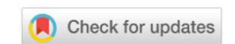
ТЕХНОСФЕРНАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ
TECHNOSPHERE SAFETY





УДК 539.3
https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-55-69

Научная статья

Обеспечение безопасности инфраструктуры газовых месторождений средствами ALARP и системного подхода

Ф.М. Дедученко ✉, **А.Н. Дмитриевский**
Институт проблем нефти и газа Российской академии наук, г. Москва, Российская Федерация
✉ fmd11@mail.ru

Аннотация

Введение. Значимую часть мировой и государственной экономики составляет добыча и поставка углеводородного сырья. Актуальность вопросов безопасности в этой сфере сохранится в течение ближайших десятилетий. Проблема активно обсуждается в профессиональном и научном сообществе. Публикуются теоретические и прикладные работы. Просчитываются и внедряются локальные, точечные методы, которые позволяют предсказывать и предупреждать аварийные ситуации в определенных узлах рассматриваемых объектов. При этом нет достаточно обоснованных и воспроизводимых системных решений, способных учитывать состояние, например, нефтяного или газового промысла как единого комплекса и выступать индикаторами не только обычных локальных аварий, но и системных аварий — катастроф. Такое научно и экспериментально обоснованное решение описано в представленной статье. Подход предложен в рамках формирования комплексной научно-технической программы (КНТП) обеспечения безопасности природно-техногенных объектов (ПТО). Цель работы — описать практику его применения в условиях конкретных газовых промыслов и обосновать отказ от ориентации на решения, учитывающие только минимальный практически приемлемый риск, то есть построенные по принципу ALARP (англ. as low as reasonably practicable).

Материалы и методы. Исходными для статьи стали результаты проведенных с участием авторов натурных испытаний природно-техногенных объектов (ПТО) нефтегазового комплекса — Южно-Русского месторождения ОАО «Севернефтегазпром» (СНГП), ООО «Газпром добыча Ямбург» («ГДЯ») и газоперекачивающей станции (ГПА) «Орловка-2» (Украина). Значимые результаты получены и доказательно физически интерпретированы при приемо-сдаточных испытаниях сертифицированного на взрывобезопасность, созданного под руководством авторов прототипа системы противодействия развитию катастроф (СПРК) на установке комплексной подготовки газа (УКПГ) в ООО «ГДЯ в 2006 году. При этом впервые в мировой практике был актирован факт раннего обнаружения и парирования без последствий средствами СПРК на УКПГ-2 развития масштабной общепромысловой катастрофы.

В виде графиков визуализированы выявленные закономерности ПТО, позволившие сформировать предвестники развития аварий и катастроф на ПТО ООО «ГДЯ», СНГП и ГПС «Орловка-2». Представлена информация о высокой экспериментальной воспроизводимости полученных результатов.

Отработана технология раннего обнаружения и парирования всех типов потенциально опасных самовозбуждающихся системных явлений на реальных ПТО инфраструктуры — автоколебаний. Представлены три случая их возбуждения на реальных газовых промыслах.

Результаты исследования. Показана фрагментарность и локальность систем аварийной защиты ПТО, базирующихся на принципе ALARP. Следствием этого стала его полная непригодность для раннего обнаружения и противодействия самоорганизованно возбуждающимся наиболее масштабным и затратным системным авариям — катастрофам, представляющим собой процессы многофакторные, ни один из факторов в которых не является определяющим. Предложенное авторами и доведенное до рабочего состояния альтернативное комплексное решение проблемы базируется на адаптированном к ПТО нефтегазового комплекса системном подходе.

Обработаны и проанализированы измеряемые параметры разных ПТО инфраструктуры — промыслов ООО «ГДЯ» и СНГП в моменты развития на них автоколебательных режимов, обусловленных самоподдерживающимися нелинейными механизмами взаимодействия элементов ПТО с постоянными (не колебательными) источниками восполнения энергии. Проиллюстрировано три таких режима самовозбуждения. Наиболее информативными при этом оказались переходные режимы работы оборудования.
По экспериментально отработанным авторами технологиям были проанализированы области критических режимов работы оборудования с выраженными потенциально опасными точками бифуркации. Представлен результат наложения обработок измеряемых параметров восьми натурных испытаний ПТО — графиков безразмерных амплитудно-частотных характеристик взаимосвязей реальной динамической системы: «вход — корпус охлаждения газа» → «выход — трубная обвязка корпуса» на частоте автоколебаний.
Обсуждение и заключение. Возможности ALARP не отвечают задачам системного мониторинга возникновения и развития опасных инцидентов на газовых месторождениях. Этот вывод можно отнести ко всем типоразмерам ПТО инфраструктуры России. Для обеспечения комплексной наблюдаемости, управляемости, безопасности и защищенности ПТО следует задействовать принципиально иные решения. Рекомендована комплексная научно-техническая программа: «Инновационные программно-аппаратные средства и технологии в обеспечение наблюдаемости, управляемости, безопасности ПТО инфраструктуры России».

Ключевые слова: природно-техногенный объект, принцип ALARP, безопасность нефтегазовых промыслов, развитие системной аварии. противодействие развитию аварий

Благодарности. Авторы выражают благодарность редакции и рецензентам за внимательное отношение к статье и указанные замечания, которые позволили повысить ее качество.

Для цитирования. Дедученко Ф.М., Дмитриевский А.Н. Обеспечение безопасности инфраструктуры газовых месторождений средствами ALARP и системного подхода. *Безопасность техногенных и природных систем.* 2023;7(4):55–69. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-55-69

Original article

Ensuring Safety of Gas Field Infrastructure Using ALARP and a Systematic Approach

Feliks M. Deduchenko ✉, Anatolii N. Dmitrievskii
Institute of Oil and Gas Problems of the Russian Academy of Sciences, Moscow, Russian Federation
✉ fmd11@mail.ru.

Abstract
Introduction. A significant part of the global and state economy is the production and supply of hydrocarbon raw materials. The issues of safety in this area will remain important in the coming decades. The problem is actively discussed in the professional and scientific community. Theoretical and applied works are published. Local, point-based methods are calculated and implemented, which allow predicting and preventing emergencies in certain units of the considered objects. At the same time, there are no sufficiently justified and reproducible system solutions that can take into account the state of, for example, oil or gas field as a single complex and act as indicators not only of ordinary local accidents, but also of systemic accidents — catastrophes. Such a scientifically and experimentally based solution is described in this article. The approach is proposed as part of the formation of a comprehensive scientific and technical program (CSTP) to ensure the safety of natural and technogenic objects (NTO). The aim of this work was to describe the practice of its application in the conditions of specific gas fields and to justify the refusal to focus on solutions that took into account only the minimum practically acceptable risk, that is, built on the ALARP principle (as low as reasonably practicable).
Materials and Methods. The article was based on the results of field tests of natural and technogenic objects (NTO) of the oil and gas complex — the Yuzhno-Russkoye field of OJSC Severneftegazprom (SNGP), LLC Gazprom Dobycha Yamburg (GDYA) and the gas pumping station (GPS) Orlovka-2 (Ukraine), conducted with the authors' participation. Significant results were obtained and evidence-based physically interpreted during acceptance tests of an explosion-proof certified, created under the guidance of the authors of a prototype of a disaster response system (DRS) at the integrated gas treatment plant (IGTP) in LLC GDYA in 2006. At the same time, for the first time in the world practice, the fact of early detection and parrying without consequences by means of DRS on the UKPG-2 of the development of a large-scale general industrial disaster was confirmed.
In the form of graphs, the revealed patterns of NTO have been visualized, which made it possible to form harbingers of the development of accidents and catastrophes at the NTO of LLC "GDYA", SNGP and GPS "Orlovka-2". Information on the high experimental reproducibility of the obtained results was presented.

The technology has been developed of early detection and parrying of all types of potentially dangerous self-exciting systemic phenomena on real NTO infrastructure — self-oscillations. Three cases of their excitation in real gas fields were presented.
Results. The paper shows the fragmentary nature and locality of emergency protection systems based on the ALARP principle. The consequence of this was its complete unsuitability for early detection and counteraction to the most large-scale and costly system accidents — catastrophes that were multifactorial processes, in which none of the factors was decisive. The alternative complex solution of the problem proposed by the authors and brought to working condition was based on a system approach adapted to the NTO of the oil and gas complex.
The measured parameters of various NTO infrastructure — fields of LLC "GDYA" and SNGP were processed and analyzed at the moments of development of self-oscillating modes on them, due to self-sustaining nonlinear mechanisms of interaction of NTO elements with constant (non-oscillatory) sources of energy replenishment. Three such modes of self-excitation were illustrated. The most informative in this case were the transient modes of operation of the equipment.
According to the technologies experimentally developed by the authors, the areas of critical operating modes of equipment with pronounced potentially dangerous bifurcation points were analyzed. The result of superimposing treatments of the measured parameters of eight full-scale tests of NTO — graphs of dimensionless amplitude-frequency characteristics of the interconnections of a real dynamic system was presented: "input — gas cooling housing" → "output — pipe casing" at the frequency of self-oscillations.
Discussion and Conclusion. The capabilities of ALARP did not meet the tasks of system monitoring of the occurrence and development of dangerous incidents in gas fields. This conclusion can be attributed to all standard sizes of NTO infrastructure in Russia. Fundamentally different solutions should be used to ensure comprehensive observability, controllability, and safety of NTO. A comprehensive scientific and technical program is recommended: "Innovative hardware and software tools and technologies to ensure the observability, controllability, and safety of the NTO infrastructure of Russia".

Keywords: natural-technogenic object, ALARP principle, safety of oil and gas fields, development of a system accident, counteraction to the development of accidents

Acknowledgements. The authors would like to thank the editorial board and the reviewers for their attentive attitude to the article and for the specified comments that improved the quality of the article.

For citation. Deduchenko FM, Dmitrievsky AN. Ensuring Safety of Gas Field Infrastructure Using ALARP and a Systematic Approach. *Safety of Technogenic and Natural Systems.* 2023;7(4):55–69. https://doi.org/10.23947/2541-9129-2023-7-4-55-69

Введение. По данным Центра исследований эпидемиологии катастроф (Centre for research on the epidemiology of disasters, CRED) практически все масштабные системные аварии фиксируются постфактум. Это свидетельствует о значительном объеме работ и усилий, которые нужны для обеспечения безопасности природно-техногенных объектов (ПТО) [1]. Следует подчеркнуть, что в данном случае безопасность представляет собой системное (интегральное) нелинейное качество сложной системы. Научные изыскания в этой сфере предполагают, в частности, пересмотр устойчивых стереотипов. Один из них — утверждение, что части определяют свойства всего объекта (в том числе и безопасность). Следует признать, что этот теоретический подход (в ряде случаев обоснованный) не находит практического подтверждения, если речь идет о проблематике, рассматриваемой в рамках данного исследования. В мире растут не только риски эпидемий и техногенных катастроф, но также реализация худших сценариев и связанные с ними колоссальные потери. Опыт последних лет доказывает крайне низкую осведомленность об особенностях таких процессов и невозможность влиять на них.

Первые в мировой практике полноценные системы аварийной защиты создали в России в 50–60-е гг. прошлого столетия. Их авторами были специалисты по созданию ракетных космических двигателей. В 1970–2010-е гг. в рамках конверсии этими уникальными достижениями смогли воспользоваться гражданские отрасли для решения проблем безопасности сложных общетехнических объектов инфраструктуры. В первую очередь наработки задействовали на объектах атомной и тепловой энергетики, в нефтегазовом комплексе, авиации. В сложившейся ситуации в 1995 году по инициативе НПО «Энергомаш имени академика В.П. Глушко» авторы представленной статьи сформировали межведомственную рабочую группу РАН в 2014 году ее узаконили решением Всероссийского научно-исследовательского института по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России (федеральный центр науки и высоких технологий).

Группа принимала участие в перечисленных ниже работах.

1. В 2006 году впервые в мировой практике создана система, которая прошла сертификацию на взрывобезопасность и позволяла противодействовать развитию реальной масштабной промышленной катастрофы.

2. В 2016 году разработана и прошла защиту Стратегия противодействия развитию катастроф.

3. В 2017 году по поручению президента РАН сформирована, научно и экспериментально обоснована, прошла защиту стратегия «Инновационные технология и средства защиты от техногенных аварий на промышленных объектах инфраструктуры России».

4. В 2021 году создан, научно и экспериментально обоснован, прошел защиту Комплексный научно-технический проект (КНТП) полного инновационного цикла «Инновационные программно-аппаратные средства и технологии в обеспечение наблюдаемости, управляемости, безопасности ПТО инфраструктуры России».

Подчеркнем, что постановка проблемы и ориентированные на ее решение технологии — результат работы сначала над Концепцией (по заданию руководства Всероссийского научно-исследовательского института по проблемам гражданской обороны и чрезвычайных ситуаций МЧС России, а затем над Стратегией РФ противодействия развитию катастроф (по решению Президиума РАН).

С точки зрения безопасности одна из существенных нелинейностей сложных многокомпонентных объектов инфраструктуры — нарушение принципа суперпозиции. Дело в том, что безопасность ПТО не определяется состоянием и функционированием образующих его элементов[1, 2, 3, 4].

Тем не менее, в реальных условиях эксплуатации ПТО мировая практика во многом остается, как и 100 лет назад, традиционной — локально ориентированной. Она строится на ошибочном принципе, согласно которому ПТО безопасен, если безопасны все его элементы. Этим обусловлена почти полная утрата контроля техногенных катастроф, которые в среднем на 4–5 порядков более затратные по последствиям в сравнении с локальными авариями в элементах ПТО. Лишь в последние десятилетия удалось понять, научно и экспериментально обосновать физические механизмы, управляющие такими инцидентами [1–4].

Отметим, что готова заявка на разработку КНТП полного инновационного цикла «Создание инновационных программно-аппаратных средств и технологий обеспечения наблюдаемости, управляемости и безопасности природно-техногенных объектов инфраструктуры России». Проект ориентирован на создание прорывных отечественных технологий повышения конкурентоспособности экономики во исполнение положений базовых документов стратегического развития России. Заявка согласована для представления в Совет по приоритетным направлениям научно-технологического развития РФ. В итоге в рамках общероссийской стратегии будет создана единая система природно-техногенной безопасности (ЕСПТБ) инфраструктуры России [1, 5, 6].

Цель работы — описать новую практику, реализованную в условиях конкретного газового промысла и обосновать отказ от ориентации на решения, учитывающие только минимальный практически приемлемый риск, то есть построенные по принципу ALARP (англ. as low as reasonably). Уточним, что перспективная, глобальная цель научных и прикладных изысканий авторов, в том числе описанных в данной статье, — создание в рамках Стратегии РФ объектно-ориентируемой Единой системы природно-техногенной безопасности (ЕСПТБ) инфраструктуры России, альтернативной выходной продукции согласно идеологии ALARP.

По данным Ростехнадзора РФ, при транспортировке жидких и газообразных углеводородов случаи локальных аварий на штатно эксплуатируемых предприятиях исчисляются сотнями и тысячами. В частности, зарегистрировано:

– 545 случаев разгерметизации на магистральных трубопроводах в течение последнего десятилетия XX века;

– 42 тыс. случаев разгерметизации на внутрипромысловых трубопроводах в течение только одного 2001 года.

Очевидно, что проблему может решить только масштабное и затратное организованное противодействие.

Первая в мире успешная практика реализована в России в 50–60-е гг. XX века — в сфере безопасности сверхмощных жидкостно-реактивных двигателей (ЖРД) космического назначения при доводочных и штатных огневых испытаниях [5]. Она известна как система аварийной защиты (САЗ).

В 80-е годы на Западе для общетехнических объектов создали аналогичную систему противоаварийной защиты (ПАЗ). Она основывается на принципе ALARP [6–9]), который неоднократно дорабатывался в России и

[1] *О Стратегии национальной безопасности Российской Федерации* Указ Президента РФ № 683 от 31.12.2015. URL: https://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_191669/ (дата обращения: 02.10.2023).

[2] *О Стратегии научно-технологического развития Российской Федерации.* Указ Президента РФ № 642 от 01.12.2016 г. URL: http://www.kremlin.ru/acts/bank/41449 (дата обращения: 02.10.2023).

[3] *Сводная стратегия развития обрабатывающей промышленности Российской Федерации до 2024 года и на период до 2035 года.* Распоряжение Правительства РФ № 1512-р. от 6 июня 2020 г. URL: http://government.ru/docs/39844/ (дата обращения: 02.10.2023).

[4] То же.

его многочисленные российские версии[5] [8–10]). Отметим, что термин ALARP возник в 70-е годы в сфере британского законодательства о здоровье и безопасности на работе, то есть вне системного подхода. Как следствие, он сохранил многие характерные для того времени, но исчерпавшие себя особенности.

При этом политика безопасности добычи и транспортировки нефти и газа согласно принципу ALARP чаще касалась процедур оптимизации рабочих процессов. Эта практика реже применялась к собственно аварийной защите из-за более слабой научной и экспериментальной отработки вопросов, связанных с соответствующими процессами.

Материалы и методы. Исследование фокусируется на проблеме создания САЗ производственной цепочки добычи и транспортировки нефти и газа на основе принципа ALARP [11–13]. Он сопутствует проекту создания ЕСПТБ ПТО, поэтому в работе проводится сопоставительный анализ обоих подходов.

Как правило, проблемы безопасности решаются при взаимодействии:

– заказчика (потребитель выходной продукции);

– исполнителя (идеолог, разработчик и производитель выходной продукции);

– стороны, причастной к созданию ПТО (проектирующие организации и предприятия, реализующие проекты).

В общем случае объект исследования — открытая диссипативная динамическая система, объединяющая взаимозависимые и взаимодействующие друг с другом и с внешней средой элементы. Для обеспечения безопасности таких ПТО учитывались две взаимодополняющие информационные компоненты:

– элементы в составе ПТО (локальные аварии);

– ПТО в целом (комплекс взаимосвязанных элементов, локальные аварии и системные катастрофы).

Обязательный этап такой работы — согласование запроса заказчика и возможностей исполнителя.

Каждая компонента — это набор процессов с собственной энергетикой и индикацией.

Результаты исследования. Подчеркнем, что само по себе изучение элементов ПТО недостаточно информативно для понимания его состояния в целом [3–4]. Наблюдаемость, управляемость и безопасность ПТО как системы не определяется характеристиками составляющих его элементов, даже если все они учтены.

Так, согласно ALARP наиболее частая причина аварий и технологических катастроф — человеческий фактор. Это не соответствует современной точке зрения [3]. Тем не менее, принцип ALARP получил в России даже более широкое распространение, чем в Великобритании. Он, в частности, рекомендован ГОСТом для управления рисками[6].

Сложившаяся ситуация не отменяет сомнений в обоснованности ALARP. Ниже представлены его установки, обусловившие явные или скрытые ограничения для качественных исследований по безопасности ПТО.

1. Элементы ПТО не взаимодействуют между собой или их взаимодействием можно пренебречь. Это противоречит реальному положению дел. Все ПТО инфраструктуры, включая нефтегазовые комплексы, представляют собой многокомпонентные, сложные динамические системы. Они жизнеспособны только при управляемом, контролируемом взаимодействии элементов. То есть ошибочность утверждения легко опровергается практикой. Почему же от него не отказываются? Дело в том, что такой подход оправдывает упрощение процедуры суммирования рисков элементов ПТО для получения интегрального риска в целом по объекту.

2. Единственные материальные носители и источники опасности для инфраструктуры ПТО — это формирующие их элементы. Утверждение верно, но исключительно в отношении аварий локального типа. Правило не работает, если речь идет о системных авариях — катастрофах, которые обходятся дороже локальных в среднем на 4–5 порядков. Катастрофы — многофакторные явления. Это следствия нарушений нормального динамического взаимодействия элементов ПТО между собой, ПТО с собственной системой управления, ПТО со смежным оборудованием, ПТО с внешней средой и пр.

3. Источники опасности в элементах ПТО статистически взаимно независимы. Это предположение неправомерно в первую очередь в отношении наиболее тяжелых системных аварий — катастроф, которые возникают из-за нарушений взаимодействия элементов ПТО.

4. В качестве меры опасности элемента принят связанный с ним риск. Не учитываются другие, более значимые риски, обусловленные нарушениями взаимодействия элементов между собой и с внешней средой ПТО. Мера опасности ПТО как функциональной единицы определяется суммой рисков его элементов [6–11, 14]. Недопустимо суммировать риски, связанные с элементами ПТО. И дело не в том, что они обычно

[5] ГОСТ Р МЭК 61511–3–2011. *Безопасность функциональная. Системы безопасности приборные для промышленных процессов.* Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200094220 (дата обращения: 02.10.2023).

[6] ГОСТ Р 54505–2011. *Управление рисками на железнодорожном транспорте.* Электронный фонд правовых и нормативно-технических документов. URL: https://docs.cntd.ru/document/1200094215 (дата обращения: 02.10.2023).

имеют разные размерности (с помощью матричного аппарата рисков размерность можно исключить [14]), а в статистической взаимозависимости источников опасности ПТО. По сценарию ALARP из этого положения нет выхода.

Как следствие, приходиться оперировать заниженными индикаторами рисков по сравнению с их действительными значениями, а значит, недооценивать реальные опасности для ПТО.

Сказанное выше позволяет сделать ряд утверждений.

– ALARP предлагает следовать устаревшему локальному подходу к решению проблем безопасности ПТО инфраструктуры, что ограничивает сферу его применения. Ситуация усугубляется умалчиванием непригодности ALARP для решения задач системного анализа состояния и поведения ПТО инфраструктуры.

– Специалисты, ориентированные на работу по ALARP, не располагают специальным инструментарием для исследования самих ПТО инфраструктуры, отработки элементов и в целом САЗ, а также для технического обслуживания выходного результата ALARP и т. п. Отметим, что такой инструментарий запланирован к разработке в рамках упомянутой ранее КНТП.

– У специалистов ALARP нет технологии, которая адекватно современной постановке задач может обеспечить требуемую информативность, управляемость и безопасность ПТО.

– Оснащение ПТО инфраструктуры системами аварийной защиты на базе ALARP не отвечает современному видению проблемы обеспечения безопасности ПТО.

Итак, главное упущение ALARP — отказ учитывать динамическое взаимодействие элементов в составе ПТО инфраструктуры.

Экспериментальные подтверждения чрезвычайной значимости динамического взаимодействия элементов ПТО нефтегазовых промыслов. Авторы представленной статьи занимают противоположную позицию и неоднократно получали подтверждение ее обоснованности при ведении научно-исследовательских и опытно-конструкторских работ, в том числе конверсионных, призванных обеспечить техногенную безопасность гражданских объектов с учетом опыта космического двигателестроения. Одной из таких гражданских сфер стала добыча и транспортировка нефти и газа. Важно отметить, что авторы располагали уникальными профильными программно-аппаратными ресурсами и технологиями (в том числе собственной разработки).

Некоторые итоги натурных испытаний разных типоразмеров ПТО были получены впервые. Для передачи этих результатов и накопленного опыта ниже представлены доказательные данные о решающей роли процессов взаимодействия элементов ПТО. Они нужны для формирования информативных компонент рабочих процессов ПТО, а также могут быть предвестниками масштабных, часто самопроизвольно развивающихся аномалий вроде техногенных катастроф [1, 3]. В реальных условиях территориально распределенных нефтегазовых промыслов взаимодействия элементов прослеживались на расстояниях:

– порядка 10 м на объектовых уровнях безопасности;

– до 100 м на цеховых уровнях;

– до 10 км на промысловом уровне.

Авторы не проводили исследования на бóльших расстояниях между элементами.

Перечислим конструктивы производственных звеньев добычи и транспортировки нефти и газа, которые формируют динамические взаимодействия элементов ПТО:

– звенья — производители энергии (камеры сгорания, газогенераторы, цилиндры двигателей внутреннего сгорания и т. п.);

– преобразователи энергии (насосы, компрессоры, турбоагрегаты);

– взаимодействующие с другими звеньями внешние и внутренние обвязки цехов, байпасы, входные и выходные коллекторы;

– звенья — накопители энергии;

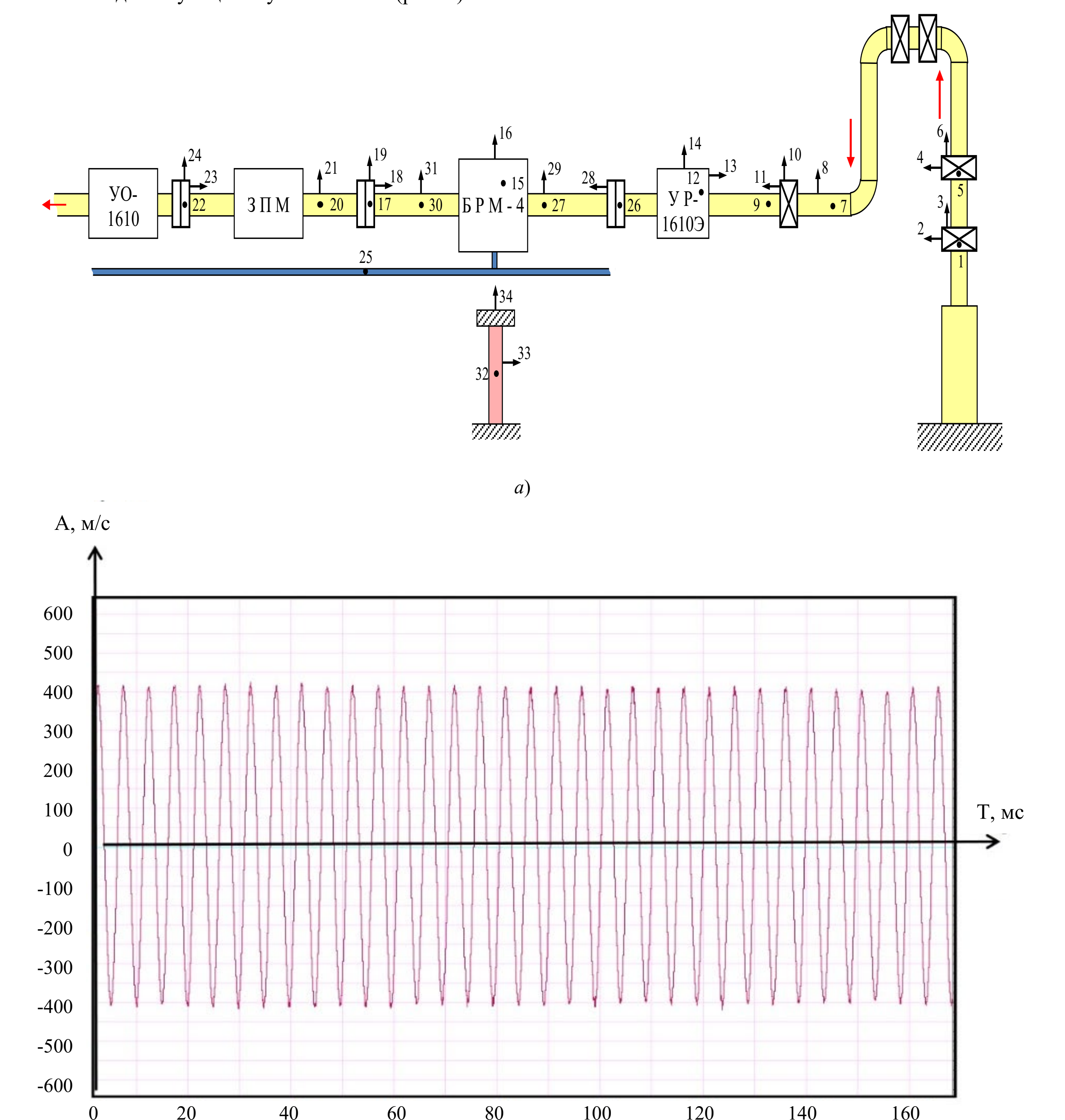
– устья скважин.

Приведенные в статье рис. 3–7 — это результаты анализа измеряемых параметров разных ПТО инфраструктуры, которые исследовала представляемая авторами Межведомственная рабочая группа РАН в ходе натурных испытаний.

Начнем с наиболее распространенных в нефтегазовом хозяйстве регулярных системных явлений — автоколебаний, обусловленных самоподдерживающимися нелинейными механизмами взаимодействия элементов ПТО с постоянными (не колебательными) источниками восполнения энергии. В описанных ниже случаях использовались результаты из собственного опыта авторов проведения натурных испытаний нефтегазовых объектов, хотя охват был существенно шире и включал ТЭС, ГРЭС, АЭС, производство и

эксплуатацию сверхмощных дизель-генераторов, турбодетандерных агрегатов (ТДА) и т. п.

Основное внимание уделялось вовремя обнаруженным эксцессам, которые, благодаря использованию технических средств, не переросли в аварии и катастрофы. Так, на Южно-Русском месторождении ОАО «Севернефтегазпрома» при фиксации мощного автоколебательного процесса динамического взаимодействия пары «наземный конструктив куста скважин → прилегающие недра» сработало аварийное отключение действующего куста скважин (рис. 1).



б)

Рис. 1. Автоколебательный процесс динамического взаимодействия пары «наземный конструктив куста скважин → прилегающие недра», зафиксированный на Южно-Русском месторождении ОАО «Севернефтегазпром»: *а* — устье скважины, *б* — фрагмент вибрационного параметра трубной головки устья скважины в начальный момент самовозбуждения мощных природно-техногенных автоколебаний с частотой ≈ 200 Гц

Поясним, что в части *а*) представлен конструктив устья скважины с 34-канальной системой измерения и регистрации вибрационных параметров 2-й нитки 9-го куста скважин. Черными стрелками показаны места датчиков и направления измерений вибрационных параметров конструктива 2-й нитки 9-го куста скважин, красными — направление движения газового потока. Здесь УО — устройство отсекающее, ИБ — измерительный блок, БРМ — блок регулирования метанола, УР — устройство регулирующее.

Авторам статьи пришлось срочно отвлечься от основной работы и принять участие в прояснении природы опасного явления. Как показали последующие расчет и анализ металла из критических сечений, усталостная прочность металлоконструкции исчерпывалась в ближайшие 2–2,5 часа.

Дополнительная обработка результатов измерения параметров позволила установить дислокации:

– постоянного источника восполнения энергии (прилегающие недра куста скважины);

– нелинейного колебательного контура (куст скважин).

Авторы отработали соответствующие методику и программно-аппаратные средства применительно к космическому двигателестроению. На частоте возбуждения автоколебаний всех пар измеряемых вибрационных параметров устья скважины когерентность почти совпала с единицей.

На рис. 2 и 3 представлены место и характеристики случая самовозбуждения автоколебаний. Авторы зафиксировали его, когда проводили натурные испытания установки комплексной подготовки газа (УКПГ) в ООО «Газпром добыча Ямбург» («ГДЯ») в частотном диапазоне 36–56 Гц (зависит от режима работы).

Как автоколебания идентифицировали физический механизм — сильное динамическое взаимодействие оборудования корпуса осушки газа и его внешней обвязки. Наиболее информативными при этом оказались испытания на переходных режимах работы оборудования:

– медленного дросселирования от 100 % режима до 65 % (по времени от 550 сек до 750 сек);

– медленного последующего форсирования от 65 % режима до 85 % (по времени от 1200 сек до 1300 сек).



Рис. 2. На установке комплексной подготовки газа (УКПГ-2) произошло сильное нелинейное взаимодействие динамических звеньев «корпус осушки газа (справа, на втором плане) ⟶ внешняя обвязка»

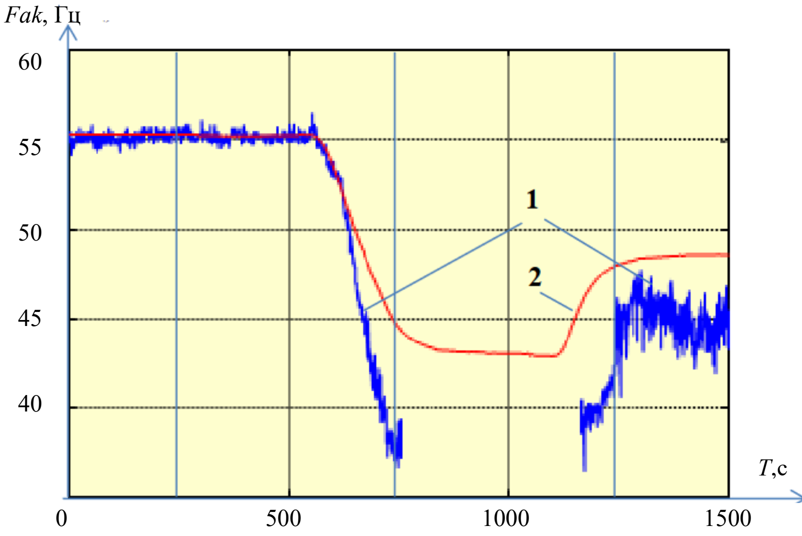


Рис. 3. УКПГ-2. Зависимость от времени частоты автоколебательного взаимодействия динамических звеньев «корпус осушки газа → его внешняя обвязка»: 1 — по данным обработки результатов натурных испытаний; 2 — по данным сопутствующего теоретического расчета

Уникальными по информативности и практической физической интерпретации обнаруженного явления оказались приемо-сдаточные испытания сертифицированного на взрывобезопасность прототипа системы

противодействия развитию катастроф (СПРК) на УКПГ-2 «ГДЯ» в 2006 году. Для подтверждения экспериментальной воспроизводимости результатов запланировали 10 однотипных натурных испытаний СПРК на режимах штатного форсирования и дросселирования. Единственным нежестким, как предполагалось, исключением было 8-е испытание. Отметим, что сложным системам присущи разные шкалы времени. В 8-м случае для получения большего, чем на предыдущих семи испытаниях, временного разрешения градиент процесса снизили более чем вдвое.

Ввиду исключительной важности результатов испытаний в дополнение к штатным измерениям программа регламентировала развертывание 96-канальной территориально распределенной системы измерения различных параметров работы объекта. На автоматизированном рабочем месте оператора СПРК в корпусе осушки газа параметры представлялись после групповой синхронизации и централизации (использовалась спутниковая система GPS).

Ярко выраженные точки бифуркации в рабочих процессах промысла (на режиме ≈ 18 % от номинала) привлекли внимание авторов задолго до приемо-сдаточных испытаний. Однако это явление ранее не вызывало эксцессов, поэтому испытания не отменили. На рис. 4 представлен результат наложения графиков восьми из запланированных десяти испытаний СПРК.

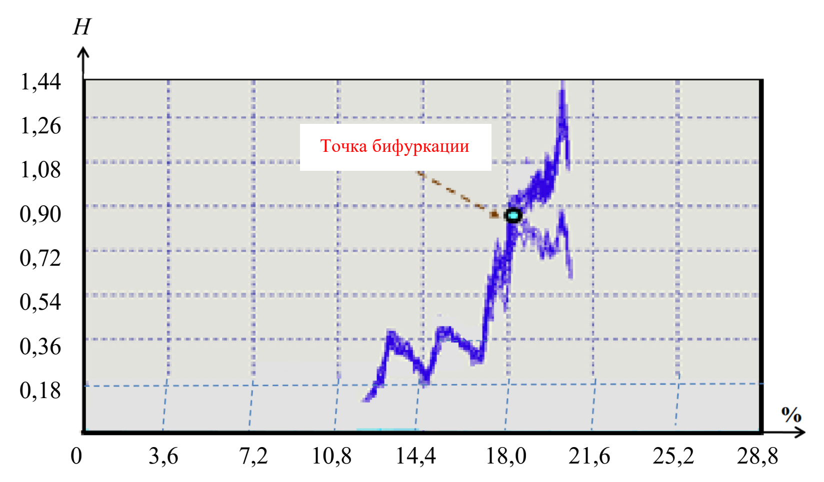


Рис. 4. УКПГ-2. Результат наложения обработок восьми натурных испытаний — графиков безразмерных амплитудно-частотных характеристик H взаимосвязей динамической системы: «вход — корпус охлаждения газа» → «выход — трубная обвязка корпуса» на частоте автоколебаний

Здесь на участках форсирования после прохождения точек бифуркации нижнюю ветвь кривой задействовали на испытаниях 1, 3, 4, 6, а верхнюю — на 2, 5, 7, 8.

Понятно, что размытость графика на рис. 4 (так же, как и графиков на рис. 6, 7 и 8 для других объектов) объясняется не ошибками измерений параметров ПТО, а наложениями результатоов обработок данных натурных испытаний, проведенных при одних и тех же значениях режимных параметров каждого объекта. При этом сама размытость графиков важна с точки зрения информативности. Она дает возможность:

– четко представить степень воспроизводимости результатов испытаний (или других параметров в зависимости от постановки задачи), то есть сделать выводы о корректности или некорректности решаемой задачи;

– взять для задач принятия решений о техническом и (или) функциональном состоянии ПТО обоснованные допуски в формах зависимости от режимных параметров ПТО во всем диапазоне или поддиапазонах значений.

На рис. 5 представлен фрагмент обработок результатов восьмого испытания в окрестности критической точки (18 % от номинала) на участке дросселирования с самопроизвольным развитием системной техногенной аварии. Тогда в корпусе охлаждения и осушки не было газовой автоматики, поэтому ситуацию корректировали вручную, с помощью байпаса. Использовали не общепринятую аварийную остановку, а обратное форсирование.

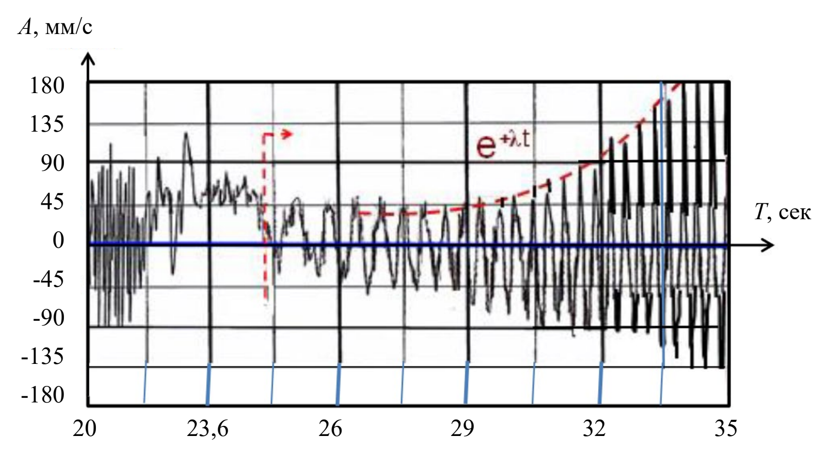


Рис. 5. УКПГ-2. Начальная стадия самопроизвольного развития системной аварии — катастрофы

Экспериментально определенный постфактум горизонт прогноза катастрофы оказался беспрецедентно большим — τ* = 90 сек при значениях показателей Ляпунова на участках возбуждения и гашения колебаний соответственно: λ_1 = + 0,14 Гц и λ_2 = –0,38 Гц. Установили причину такого редкого явления в эксплуатации ПТО. Оно обусловлено обнаруженным (видимо, впервые в мировой практике) механизмом двухкаскадного сценария возбуждения и развития катастрофы. На первом шаге ранее установленного критического режима с точкой бифуркации, представленной на рис. 4, произошло цеховое системное возбуждение группы элементов промысла — турбодетандерных агрегатов во взаимодействии с внешней трубной обвязкой. Оно же сыграло роль спускового механизма на втором шаге, который характеризуется сильным взаимодействием устьев скважин с недрами.

Впоследствии развитие этой общепромысловой катастрофы квалифицировали как первое в мировой практике вовремя обнаруженное (что позволило принять меры противодействия) чрезвычайно опасное региональное техногенно-природное землетрясение магнитудой от 6 до 7 баллов по шкале Рихтера. Источником энергии были недра, конструктивы кустов скважин сработали как спусковой механизм. Определяющую роль сыграло выполненное вручную понижение градиента дросселирования на восьмом приемо-сдаточном испытании и, соответственно, увеличение времени пребывания промысла в опасной зоне — в окрестности критической точки бифуркации на режиме ≈ 18 % от номинала.

Сейчас стали всеобщей практикой отстройка от зон дислокации резонансных частот или их ускоренное преодоление на переходных режимах. В качестве примеров можно привести ЖРД космического назначения, АЭС, ГЭС, авиационную технику и т. п.

Исключительную важность представляют два фактора, реализованные во время приемо-сдаточных испытаний.

1. Системный подход к организации и проведению испытаний СПРК. Формирование пакета исходных экспериментальных данных для понимания сути механизма и противодействия развитию чрезвычайно опасного явления — общепромысловой катастрофы, которая территориально и по времени совпала с техногенно-природным землетрясением. Свойственный ALARP и его выходной продукции локальный подход в данном случае оказался не востребован.

2. Высокая информативность. Штатная система измерения параметров промысла получила дополнение. Задействовали территориально распределенную систему измерения параметров с групповой синхронизацией и централизацией параметров. Штатно измеряемые параметры промысла указали на развитие ЧС:

– за доли секунды до ее завершения, когда аварийная защита была невозможна;

– только по вторичным признакам в высокочастотном диапазоне (главные события фиксировались на низких частотах).

На рис. 6 представлены наложения результатов обработок двенадцати натурных испытаний турбодетандерных агрегатов в корпусе осушки газа УКПГ-2 ООО «ГДЯ» в течение полутора месяцев проведения ремонтных работ.

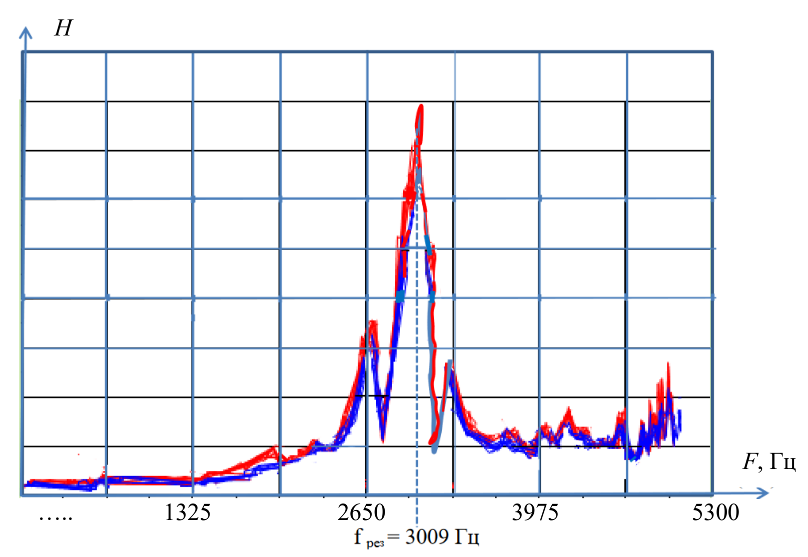


Рис. 6. Экспериментально воспроизводимые амплитудно-частотные характеристики динамической системы «ТДА-2 → ТДА-7»

В данном случае использовался созданный авторами двухканальный модульный блок высокоточного синхронного выделения частотных компонент $53F_p$ (53 — число лопаток турбин исследуемого типоразмера турбодетандерных агрегатов) в осевых вибрационных параметрах турбин ТДА-2 и ТДА-7. Действовали режимы медленного форсирования (кривые красного цвета) и дросселирования (кривые синего цвета) ТДА-2. Работа шла на номинальном штатном режиме ТДА-7.

Таким образом, налицо воспроизводящиеся в широком частотном диапазоне до 5300 Гц амплитудно-частотные характеристики резонансного типа (Fрез = 3009 Гц) потенциально опасного высокодобротного ($Q \approx 76{,}5$) динамического взаимодействия ТДА-2 и ТДА-7. Потребовалось разработать и реализовать серьезные мероприятия по противодействию. Кроме того, для подтверждения их эффективности проводились дополнительные натурные испытания. Это уникальный случай экспериментально воспроизводимого системного тестирования ТДА-2 на режимах запусков и остановок его динамического взаимодействия со смежным, работающим на номинальном режиме ТДА-7 в широком частотном диапазоне. Данный экспериментально отработанный подход и адекватную ему технологию можно использовать при эксплуатации любого оборудования роторного и (или) поршневого типов. Важно иметь ввиду, что формируемые по аналогичным характеристикам (см. рис. 6) предвестники развития на ПТО ЧС — системные. Они подходят для решения задач идентификации типа развивающейся аварии — локальной и системной (катастрофы).

На рис. 7 и 8 представлены экспериментально воспроизводимые системные закономерности взаимодействия газоперекачивающих агрегатов (ГПА). Они отработаны на газоперекачивающей станции «Орловка-2» (Украина) и принципиально не отслеживаются системами, основанными на ALARP. Общее число натурных испытаний по рис. 7 (ГПА-1 → ГПА-2) — 14, по рис. 8 («ГПА-4 → ГПА-5») — 18.

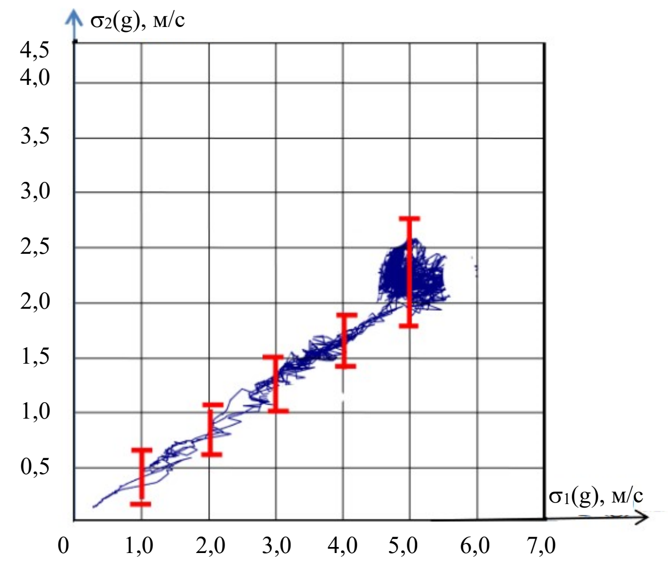


Рис. 7. ГПС «Орловка-2» (Украина). Воспроизводимые закономерности взаимодействия «ГПА-1 → ГПА-2»

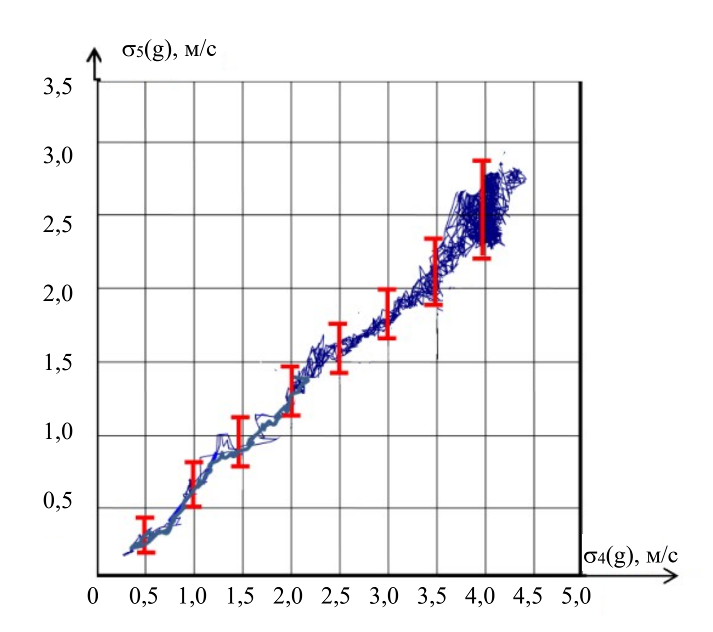


Рис. 8. ГПС «Орловка-2» (Украина). Воспроизводимые закономерности системного взаимодействия «ГПА-4 → ГПА-7»

На рисунках закономерности показаны в виде годографов в формах зависимости, измеряемых в горизонтальном и вертикальном направлениях среднеквадратических значений виброскоростей ГПА от суммарного расхода газа через ГПС — *g*. Для определенности выбрали частотный диапазон измерений среднеквадратичных значений 0,1–5 Гц. Согласно статистике, именно в этом диапазоне в конструктивах ПТО часто происходят процессы с крупной самоорганизованной концентрацией энергии, которые провоцируют развитие аварийных исходов — как локальных, так и более затратных системных. Несмотря на существенные отличия физических механизмов, в данном случае полученные результаты можно безальтернативно использовать при эксплуатации оборудования роторного типа, а при соответствующей адаптации — и не роторного.

Для разработки упомянутых выше прототипа СПРК и Стратегии РФ противодействия развитию системных аварий — катастроф [1, 3] существенно значимы:

– воспроизводимость результатов натурных испытаний;

– экспериментальная обоснованность статистически корректных прикладных результатов.

Отметим также важность ожидаемого специалистами типового сценария развития системных аварий разной физической природы. Для подтверждения воспроизводимости результатов потребовалось не менее десяти лет целевых научно-экспериментальных работ. Это позволило реализовать в СПРК и затем отразить в Стратегии РФ комплекс унифицированных алгоритмов и технических средств раннего обнаружения, мониторинга и защиты от всех типов техногенных аварий.

Отработано чрезвычайно важное качество этого комплекса — объектная ориентируемость (возможность глубокой адаптации практически к любым типоразмерам ПТО инфраструктуры).

Отметим также характерную для системного подхода особенность, которая позволяет делать верные выводы даже в том случае, если экспериментальная воспроизводимость результатов натурных испытаний ПТО представляется слабой или вообще не обнаруживается. Следует учитывать, что один и тот же элемент сложной системы (например, компрессор) демонстрирует разные свойства и поведение, даже если функционирует в составе одного ПТО. Это зависит от того, рассматривается ситуация до или после ремонта. Данный эффект легко спутать с плохой воспроизводимостью результатов испытания компрессора.

Результаты сопоставительного анализа систем аварийной защиты, адекватных принципу ALARP и системному подходу КНТП. Практически во всех публикациях, связанных с принципом ALARP, присутствуют условия, из которых исходит ALARP. По каким-то причинам они должны исполняться сами собой, и это повод для критики. Принцип ALARP можно безоговорочно использовать для класса объектов, представляющих собой наборы таких объектов, которые не связаны друг с другом, не взаимодействуют и статистически независимы. Таким образом, полезность ALARP ограничивается отдельными исследованиями вне системы каждого элемента ПТО. Так же, вне системы, рассматривается класс свойственных элементам локальных аварий. Принцип ALARP не подходит для адекватного исследования ПТО как цельной структуры, формирования адекватной симптоматики, алгоритмов принятия решений и т. п.

Используя любой инструментарий, базирующийся на идеологии ALARP (и САЗ в том числе), мы должны понимать, что идем на сознательное ограничение.

Единственным выходом представляется оперативное создание систем безопасности, альтернативных тем, которые ориентируются на ALARP. Базой для новых решений должен быть задел, сформированный для выполнения комплексной научно-технической программы «Создание инновационных программно-аппаратных средств и технологий обеспечения наблюдаемости, управляемости и безопасности природно-техногенных объектов инфраструктуры России».

Приведем основные аргументы готовности к созданию систем безопасности и аварийной защиты в рамках КНТП как альтернативы САЗ по идеологии ALARP.

– Созданы сертифицированные прототипы профессионального инструментария, в том числе во взрывобезопасном исполнении, для экспериментальной отработки компонент системы противодействия развитию аварий и катастроф.

– Системы аварийной защиты по КНТП базируются на совмещенных локальных и системных подходах к исследованию ПТО инфраструктуры в рамках теории самоорганизованной критичности [3].

– В системах аварийной защиты по КНТП учтено открытие 50–60-х гг. российского космического двигателестроения [6]. Речь идет о двух типах физической природы аварийных исходов. В современной терминологии их называют локальными (в элементах ПТО) и масштабными, системными (в ПТО как целостной функциональной единице). САЗ по схеме ALARP реагирует на развитие только малозатратных локальных аварий.

– Системы аварийной защиты по КНТП готовы к принятию мотивированных решений о начале развития в ПТО всех типов локальных аварий и системных аварий — катастроф. Это отличает их от САЗ по схеме ALARP, реагирующей только на локальные аварии.

– В системах аварийной защиты по КНТП достигнута готовность перевода ПТО в безопасное состояние по двум сценариям. Первый: перевод ПТО на щадящие режимы работы. Второй: аварийное отключение в порядке реагирования на мотивированные решения о развитии нештатных критических ситуаций.

– Сняты ограничения на сферу применения систем аварийной защиты по КНТП по типу выставляемых априорных условий для САЗ по схеме ALARP.

– В системах аварийной защиты по КНТП научно и экспериментально отработана симптоматика развития локальных, системных критических состояний ПТО и правил принятия решений о переводе ПТО в безопасное состояние.

– Достигнута готовность (при принятии соответствующего решения) отработки быстродействующего механизма перевода ПТО в безопасное состояние для наиболее опасных аварий взрывоподобного типа с характерным для них временем развития $\Delta t \approx 30–70$ мс.

Обсуждение и заключение. Рассмотрены системы аварийной защиты, разработанной по КНТП «Наблюдаемость, управляемость, безопасность ПТО инфраструктуры России». Оценены их возможности в условиях Северо-Западного региона РФ [1]. Новый подход сравнивается с распространенным на Западе и в России принципом ALARP.

Показано, что ALARP изжил себя, т. к. его локальная ориентация не отвечает задачам системного мониторинга ПТО инфраструктуры [8–14]. Подход ALARP остался на уровне, принятом, как минимум, 100 лет назад, в первой половине XX века. Именно так нужно оценивать разработки, реализуемые по схеме ALARP, и их выходную продукцию, в том числе системы аварийной защиты [8–14].

Исследования и практика свидетельствуют о том, что методология ALARP не обеспечивает комплексную наблюдаемость, управляемость, безопасность природно-техногенных объектов инфраструктуры. По этой причине подход, основанный на ALARP, не дает своевременной, качественной индикации развития разрушительных системных аварий — катастроф.

Системы аварийной защиты, создаваемые по предлагаемому проекту КНТП, интегрируют локальный и комплексный подходы к мониторингу инфраструктуры в рамках теории самоорганизованной критичности [3].

Показана перспективность замещения подходов на базе ALARP решениями, соответствующими КНТП.

Список литературы

1. Дедученко Ф.М. Технологические, экологические и организационные аспекты обеспечения природно-техногенной безопасности нефтегазовой отрасли России. В: *Пути реализации нефтегазового потенциала Западной Сибири. Материалылы XXV науч.-практ. конф.* Ханты-Мансийск: Научно-аналитический центр рационального недропользования им. В.И. Шпильмана; 2022. С. 12–28

2. Дмитриевский А.Н., Мастепанов А.М., Бушуев В.В. Ресурсно-инновационная Стратегия развития экономики России. *Вестник российской академии наук*. 2014;84(10):867–873.

3. Бак П. Как работает природа. Теория самоорганизованной критичности. Москва: URSS; 2022. 288 с.

4. Малинецкий Г.Г. Чудо самоорганизованной критичности. В кн.: *Как работает природа. Теория самоорганизованной критичности*. Москва: URSS; 2022. С. 13–44.

5. Акимов В.А., Дедученко Ф.М., Дурнев Р.А., Рвачев А. Т., Арабский А. К., Кульчицкий А. Б. и др. Концепция создания единой системы комплексной техногенной безопасности и защищенности промыслов нефтегазового комплекса РФ. *Газовая промышленность*. 2015;(S4(732));70–83.

6. Дедученко Ф.М. Проект противодействия развитию катастроф на природно-техногенных объектах инфраструктуры России. *Надежность и безопасность энергетики*. 2021;14(3):111–117. https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-3-111-117

7. Cox L.A. What's wrong with risk matrices? *Risk analysis*. 2008;28(2):497–511. https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01030.x

8. Pickering A., Cowley S.P. Risk Matrices: implied accuracy and false assumptions. *Journal of Health & Safety Research & Practice*. 2010;2(1):11–18. URL: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7634511/-mod_resource/content/0/Risk%20matrices%20false%20assumptions.pdf (дата обращения: 02.10.2023).

9. Bychkov S., Rudnitska R., Maggs R., Kesteren M., Aramyan G., Németh E. et al. *Risk assessment in audit planning. A guide for auditors on how best to assess risks when planning audit work.* 2014. 46 p. URL: https://www.pempal.org/sites/pempal/files/event/attachments/cross_day-2_4_pempal-iacop-risk-assessment-in-audit-planning_eng.pdf.

10. Новожилов Е.О. Принцип построения матриц рисков. *Надежность*. 2015;3:73–86. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2015-0-3-73-86

11. Карманов А.В., Телюк А.С., Шершукова К.П. Реализация принципа ALARP при синтезе многоканальной системы противоаварийной защиты. *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. 2014;(6):36–40.

12. Телюк А.С. *Синтез систем противоаварийной защиты для процессов подготовки продукции нефтегазовых скважин*. Автореф. дис. канд. тех. наук. Москва; 2014. 24 с. URL: https://new-disser.ru/_avtoreferats/01007881385.pdf?ysclid=lpmoogd1bk891406616 (дата обращения: 02.10.2023)

13. Телюк А.С. Программное обеспечение автоматизированного синтеза систем противоаварийных защит. *Автоматизация, телемеханизация и связь в нефтяной промышленности*. 2014;1:36–39.

14. Гапанович В.А., Шубинский И.Б., Замышляев А.М. Метод оценки рисков системы из разнотипных элементов. *Надежность*. 2016;(2):49–53. https://doi.org/10.21683/1729-2640-2016-16-2-49-53

References

1. Deduchenko FM. Tekhnologicheskie, ekologicheskie i organizatsionnye aspekty obespecheniya prirodno-tekhnogennoi bezopasnosti neftegazovoi otrasli Rossii. In: *Puti realizatsii neftegazovogo potentsiala Zapadnoi Sibiri. Mat-ly XXV nauch.-prakt. konf.* Khanty-Mansiysk: V.I.Shpilman research and analytical centre for the rational use of the subsoil; 2022. P. 12–28. (In Russ.).

2. Dmitrievskii AN, Mastepanov AM, Bushuev VV. Resource-innovative strategy of Russia's economic development. *Herald of the Russian Academy of Sciences.* 2014;84(10):867–873. https://doi.org/10.7868/S0869587314100077 (In Russ.).

3. Bak P. *Kak rabotaet priroda. Teoriya samoorganizovannoi kritichnosti.* Moscow: URSS; 2022. 288 p. (In Russ.).

4. Malinetskii GG. Chudo samoorganizovannoi kritichnosti. In book: *Kak rabotaet priroda. Teoriya samoorganizovannoi kritichnosti.* Moscow: URSS; 2022. P. 13–44. (In Russ.).

5. Akimov VA, Deduchenko FM, Durnev RA, Rvachev AT, Arabskii AK, Kulchitskii AB, et al. Kontseptsiya sozdaniya edinoi sistemy kompleksnoi tekhnogennoi bezopasnosti i zashchishchennosti promyslov neftegazovogo kompleksa RF. *Gazovaya promyshlennost'.* 2015;(S4(732));70–83

6. Deduchenko FM. Project of counteracting catastrophic developments at nature-man-made objects in Russia. *Safety and Reliability of Power Industry.* 2021;14(3):111–117. https://doi.org/10.24223/1999-5555-2021-14-3-111-117 (In Russ.).

7. Cox LA. What's wrong with risk matrices? *Risk analysis*. 2008;28(2):497–511. https://doi.org/10.1111/j.1539-6924.2008.01030.x

8. Pickering A, Cowley SP. Risk matrices: implied accuracy and false assumptions. *Journal of Health & Safety Research & Practice*. 2010;2(1):11–18. URL: https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/7634511/-mod_resource/content/0/Risk%20matrices%20false%20assumptions.pdf (accessed: 02.10.2023)

9. Bychkov S, Rudnitska R, Maggs R, Kesteren M, Aramyan G, Németh E, et al. *Risk assessment in audit planning. A guide for auditors on how best to assess risks when planning audit work.* 2014. 46 p. URL: https://www.pempal.org/sites/pempal/files/event/attachments/cross_day-2_4_pempal-iacop-risk-assessment-in-audit-planning_eng.pdf.

10. Novozhilov EO. Guidelines for construction of a risk matrix. *Dependability*. 2015;3:73–86. https://doi.org/10.21683/1729-2646-2015-0-3-73-86 (In Russ.).

11. Karmanov AV, Telyuk AS, Shershukova KP. ALARP principal implementation while performing synthesis of milti-channel emergency protection system. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoi promyshlennosti.* 2014;6:36–40. (In Russ.).

12. Telyuk AS. *Sintez sistem protivoavariinoi zashchity dlya protsessov podgotovki produktsii neftegazovykh skvazhin.* Author's thesis. Moscow; 2014. 24 p. URL: https://new-disser.ru/_avtoreferats/01007881385.pdf?ysclid=lpmoogd1bk891406616 (accessed: 02.10.2023) (In Russ.).

13. Telyuk AS. Programmnoe obespechenie avtomatizirovannogo sinteza sistem protivoavariinykh zashchit. *Avtomatizatsiya, telemekhanizatsiya i svyaz' v neftyanoi promyshlennosti*. 2014;1:36–39. (In Russ.).

14. Gapanovich VA, Shubinsky IB, Zamyshlyaev AM. Risk assessment of a system with diverse elements. *Dependability*. 2016;2:49–53. 2016;(2):49–53. https://doi.org/10.21683/1729-2640-2016-16-2-49-53 (In Russ.).

Поступила в редакцию 28.09.2023
Поступила после рецензирования 16.10.2023
Принята к публикации 20.10.2023

Об авторах:

Феликс Михайлович Дедученко, доктор физико-математических наук, главный научный сотрудник, руководитель комплексной научно-технической программы института проблем нефти и газа Российской Академии наук (119333 г. Москва, ул. Губкина, 3), fmd11@mail.ru

Анатолий Николаевич Дмитриевский, академик РАН, научный руководитель института проблем нефти и газа РАН (119333 г. Москва, ул. Губкина, 3), director@ipng.ru

Заявленный вклад соавторов:

Ф.М. Дедученко — формирование основной концепции, цели и задачи исследования, расчеты, подготовка текста, формулирование выводов.

А.Н. Дмитриевский — научное руководство, анализ результатов исследований, доработка текста, корректировка выводов.

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Received 28.09.2023
Revised 16.10.2023
Accepted 20.10.2023

About the Authors:

Feliks M. Deduchenko, Dr. Sci. (Physi.-Math.), Chief Researcher, Head of the Integrated Scientific and Technical Program, Institute of Oil and Gas Problems of the Russian Academy of Sciences (3, Gubkina Str., Moscow, 119333, RF), fmd11@mail.ru

Anatolii N. Dmitrievskii, Academician of the Russian Academy of Sciences, Science Director, Institute of Oil and Gas Problems of the Russian Academy of Sciences (3, Gubkina Str., Moscow, 119333, RF), director@ipng.ru

Claimed contributorship:

FM Deduchenko: formulation of the basic concept, goals and objectives of the study, calculations, preparation of the text, formulation of the conclusions;

AN Dmitrievsky: academic advising, analysis of the research results, revision of the text, correction of the conclusions.

Conflict of interest statement: the authors do not have any conflict of interest.

All authors have read and approved the final manuscript.